

文章编号:1671-251X(2009)04-0055-04

# 冻结监测中分布式光纤测温系统的研究

赵玉明, 李长忠

(煤炭科学研究总院建井研究分院, 北京 100013)

**摘要:**文章根据冻结工程信息化施工的要求,将分布测量理论和光纤传感技术引入到冻结监测中,并结合某矿井冻结工程的实际情况,对分布式光纤测温系统的工作原理、性能指标温度解调方案进行了详细的分析与研究,成功设计出一套满足冻结施工要求的分布式光纤测温系统。该系统依据光时域反射技术和后向拉曼散射温度效应实现温度测量,提高了测量精度和稳定性,降低了系统成本。室内实验及现场试验验证了该系统的测量精度性与可靠性,为冻结温度监测提供了一种新的监测手段。

**关键词:**矿井; 冻结监测; 温度监测; 分布式光纤; 温度解调

**中图分类号:**TD265.34

**文献标识码:**B

收稿日期:2008-11-14

**作者简介:**赵玉明(1979-),男,辽宁朝阳人,硕士,现在煤炭科学研究总院建井研究分院从事冻结法施工工艺及冻结温度监测方面的研究与应用工作。E-mail:zhaoyuming1569@126.com

## 0 引言

在矿井冻结工程施工过程中,为了实时掌握冻结壁的发展情况,需要设置温度监测系统。目前,冻

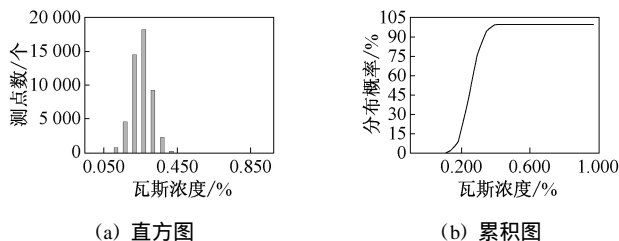


图5 08工作面瓦斯浓度波动客观规律图

实测的瓦斯浓度值,实际上是在各巷道瓦斯涌出的特定组合下对现实系统的有限次抽样。基于各巷道瓦斯涌出相互独立的假设,通过对各巷道瓦斯涌出规律的大样本抽样以及对每次抽样进行全系统流量平衡所得到的瓦斯浓度统计规律,与瓦斯浓度的实测值相比,抽样次数更多,各巷道瓦斯涌出的组合也更加随机,因而更加接近客观规律。

## 4 结语

本文提出的基于蒙特卡洛方法的瓦斯测值分析模型利用测点上游区域划分法计算出矿井各巷道的瓦斯涌出历史规律,然后采用蒙特卡洛方法对全矿井瓦斯涌出规律进行分析,并在此基础上采用全系统瓦斯流量平衡算法得出瓦斯浓度规律。该模型经过实际应用后,结果表明其研究意义在于:

(1) 采用测点上游区域划分的方法计算全矿井

各巷道的瓦斯涌出历史规律,在瓦斯数据处理方面首次提供了一种根据已知的历史数据生成未知“准历史数据”的方法,对于井下无瓦斯测点布置的巷道的瓦斯预测具有重要意义。

(2) 采用蒙特卡罗方法对全矿井瓦斯涌出历史规律进行计算机模拟,得到的大样本抽样下巷道瓦斯涌出客观规律在一定程度上减少了人工或仪器检测时不可避免的误差和失误,比由历史数据统计得到的瓦斯涌出规律更接近客观规律。

(3) 假设各巷道瓦斯涌出相互独立,采用全系统瓦斯流量平衡算法,得到的大样本抽样下巷道瓦斯浓度统计规律,在抽样次数和样本独立性上比实测值更有优势,因而更加接近客观规律。

## 参考文献:

- [1] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2000.
- [2] 王银宏,严光生,翟裕生. 三部式潜在矿产资源定量评价与蒙特卡罗模拟[J]. 中国矿业, 2006, 15(6): 14~17.
- [3] KALOS M H, WHITLOCK P A. Monte Carlo Method[M]. New York: Wiley, 1986.
- [4] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡罗方法[M]. 北京:北京工业学院出版社, 1988.

结壁温度监测常采用多线制测量及一线总线式测量<sup>[1]</sup>方式。多线制测量方式布线困难、成本高;一线总线式测量方式布线简单、测温点可任意布置,但任意一点的损坏将导致整个测温总线失效<sup>[2]</sup>。这 2 种方式都是通过获得离散点温度信息推断冻结壁的发展情况,很难全面掌握冻结壁的全部温度信息。因此,笔者采用光纤技术设计了一种分布式光纤测温系统。该系统主要依据光时域反射技术和后向拉曼散射温度效应实现温度测量,近于连续分布的测温点使以往孤立点的温度监测发展为沿缆线的温度监测,使得系统能够测量整个冻结壁的温度梯度,克服了传统测温方式依靠检测离散点温度信息推断整个温度场分布特征的弊端,消除了离散点测量带来的不安全因素<sup>[3]</sup>。同时,光纤本身的抗电气干扰、耐腐蚀的性能大大提高了系统的稳定性。

## 1 系统设计

### 1.1 系统工作原理

分布式光纤测温系统的工作原理如图 1 所示。

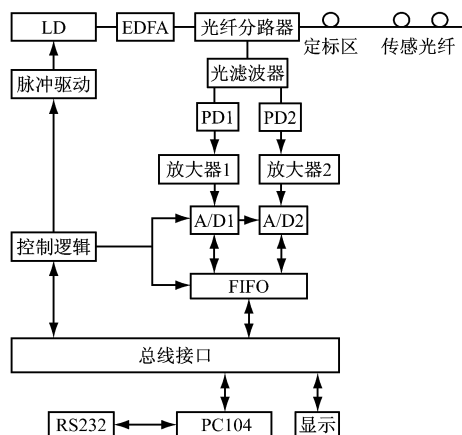


图 1 分布式光纤测温系统的工作原理图

该系统采用后向散射探测方法,由半导体激光器(LD)产生很窄的泵浦光脉冲,经光纤放大器(EDFA)提升功率后,通过光纤分路器耦合进传感光纤,在传感光纤中将产生后向散射光,回来的后向散射光再经光纤分路器耦合进光滤波器进行滤波和分离,从而得到携带温度信号的后向反斯托克斯拉曼散射光和作为参考信号的后向瑞利散射光,自此便完成了信号的采集工作;从光滤波器分离出来的后向反斯托克斯拉曼散射光和后向瑞利散射光再分别进入光电探测器 PD1、PD2 进行光电转换及前级放大,完成信号的光电转换工作;转换后的电平信号分别进入放大器 1 和放大器 2 进行放大,然后分别由 2 片 A/D 卡(A/D1 和 A/D2)进行模数转换,得

到数字信号,经 FIFO 数据缓存后进入计算机进行信号处理和分析计算,最终得到对应点的温度信息。因此,发出光脉冲后,对后向拉曼散射光信号进行高速的多点采样,就可获得沿光纤轴向的温度场分布,实现分布式温度测量。

### 1.2 系统最佳波长的确定

分布式光纤测温系统的温度灵敏度可表示为

$$\frac{dR(T)}{dT} = \left( \frac{1 + \frac{hc}{\lambda_0 kT}}{1 - \frac{hc}{\lambda_0 kT}} \right)^4 \cdot e^{-\frac{hc}{\lambda_0 kT}} \cdot \frac{hc}{K T^2} \quad (1)$$

式中:  $R(T)$  为反斯托克斯光强比值;  $T$  为温度值;  $\lambda_0$  为系统波长;  $\lambda$  为偏移波数;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光速;  $K$  为玻尔兹曼常量。

由式(1)可知,系统的温度灵敏度随所选激光器中心波长的增加而提高<sup>[4]</sup>。但随着激光器工作时间的增加,其中心波长会因管芯发热而向长波长方向漂移,相应的后向拉曼散射光信号的中心波长也会随之发生变化,从而影响整个系统的稳定性。尽管激光器的中心波长漂移量很小,但也会给系统带来明显的不利影响。根据大量试验得出:系统的中心波长越短,对系统的稳定性越有利<sup>[5~6]</sup>。

由上述可知,从灵敏度角度看,系统中心波长越长越好;从工作稳定性角度看,系统中心波长越短越好。在选取系统中心波长时,应着重考虑信号强度,兼顾系统的温度灵敏度和稳定性。根据实验和研究,得出分布式光纤测温系统的测量距离与激光器中心波长的关系<sup>[7]</sup>如图 2 所示。因此,该系统选取激光器中心波长为 1 550 nm。

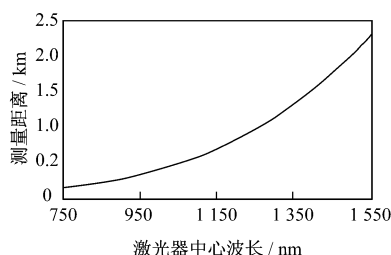


图 2 分布式光纤测温系统的测量距离与激光器中心波长的关系图

## 2 系统的温度解调方案

分布式光纤测温系统利用后向反斯托克斯拉曼散射光功率曲线解调后向瑞利散射光功率曲线,其实现过程:先测出整段光纤在  $T = T_0$  ( $T_0$  为参考温度)时的后向反斯托克斯拉曼散射光功率曲线和后向瑞利散射光功率曲线,然后将两者相比得到基线;测出光纤在任意温度  $T$  时的后向反斯托克斯拉曼散射光功率曲线和后向瑞利散射光功率曲线,将两

者相比得到一条新曲线并与基线相比,从而得到温度关系式。具体推导如下:

$T = T_0$  时,后向反斯托克斯拉曼散射光功率

$P_{as}(T_0)$  和后向瑞利散射光功率  $P_R(T_0)$  分别为

$$P_{as}(T_0) = \frac{c}{2m} E_0 \frac{e^{\left(\frac{h}{KT_0}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{h}{KT_0}\right)}} a_s e^{-(\alpha_0 + a_s)L} \quad (2)$$

$$P_R(T_0) = \frac{c}{2n_1} E_0 R e^{-2\alpha_0 L} \quad (3)$$

式中:  $m$  为光纤折射率;  $E_0$  为激光器光脉冲能量;  $\nu$  为光纤的拉曼频移量;  $a_s$ 、 $R$  分别为单位长度光纤中后向反斯托克斯拉曼散射光和后向瑞利散射光的散射系数;  $\alpha_0$ 、 $a_s$  分别为激光器中心波长和后向反斯托克斯散射光波长处光纤的损耗;  $L$  为光纤长度。

式(2)除以式(3)得到基线表达式:

$$\frac{P_{as}(T_0)}{P_R(T_0)} = \frac{e^{\left(\frac{h}{KT_0}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{h}{KT_0}\right)}} \frac{a_s}{R} e^{(\alpha_0 - a_s)L} \quad (4)$$

系统在温度  $T$  时的后向反斯托克斯拉曼散射光功率和后向瑞利散射光功率分别为

$$P_{as}(T) = \frac{c}{2m} E_0 \frac{e^{\left(\frac{h}{KT}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{h}{KT}\right)}} a_s e^{-(\alpha_0 + a_s)L} \quad (5)$$

$$P_R(T) = \frac{c}{2n_1} E_0 R e^{-2\alpha_0 L} \quad (6)$$

式(5)除以式(6)得:

$$\frac{P_{as}(T)}{P_R(T)} = \frac{e^{\left(\frac{h}{KT}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{h}{KT}\right)}} \frac{a_s}{R} e^{(\alpha_0 - a_s)L} \quad (7)$$

式(7)除以式(4)得:

$$\frac{\frac{P_{as}(T)}{P_R(T)}}{\frac{P_{as}(T_0)}{P_R(T_0)}} = \frac{e^{\left(\frac{h}{KT}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{h}{KT_0}\right)} - 1} \quad (8)$$

因此,系统的温度解调表达式可表示为

$$T = \frac{h}{K \ln \left[ 1 + \frac{\exp(h/KT_0) - 1}{P_{as}(T_0)} P_{as}(T) \right]} \quad (9)$$

该温度解调方案可抑制温漂噪声积累和后向瑞利散射光子窜扰后向反斯托克斯散射光子,使测量精度保持较高水平;同时也可用后向瑞利散射光信号的电脉冲触发高速信号采集卡与累加器同步工作,省去同速同步触发电源,可进一步提高系统的安全性,降低系统成本。

### 3 性能测试

#### 3.1 室内实验

将分布式光纤测温系统调试好后,将全部传感

光纤置于  $-45^\circ\text{C}$  的环境中,运行自主研发的测温软件包程序,得到的拉曼曲线、瑞利曲线、温度曲线如图 3 所示。

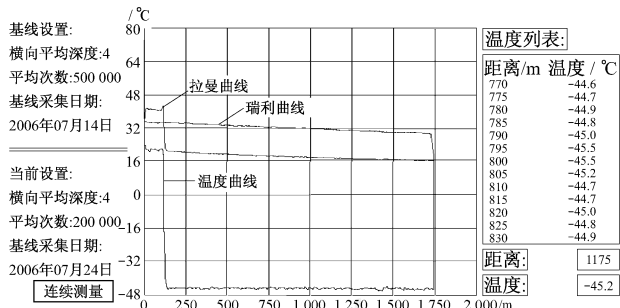


图 3  $-45^\circ\text{C}$  时系统性能曲线

将全部传感光纤置于  $-15^\circ\text{C}$  的环境中,得到分布式光纤测温系统的拉曼曲线、瑞利曲线、温度曲线如图 4 所示。

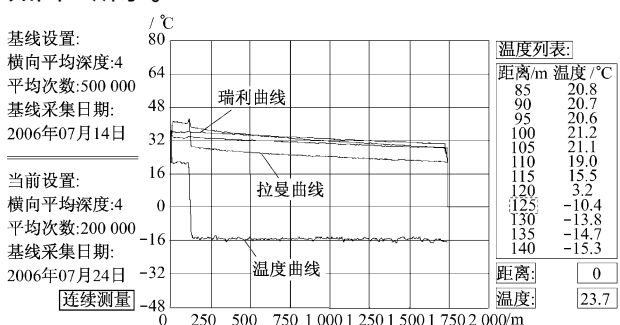


图 4  $-15^\circ\text{C}$  时系统性能曲线

从图 3、图 4 可看出,分布式光纤测温系统能比较真实地反映光纤沿线的温度,所测得的温度曲线比较平滑,系统测量精度可达  $1^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2 现场试验

将分布式传感光纤与一线总线式测温电缆同时下放到测温孔中,并在一一线总线式测温点处固定一个传感光纤环,使传感光纤环与一线总线式测温系统的测温点相对应。开启一线总线式测温系统与分布式光纤测温系统,测得的地层原始地温曲线如图 5 所示。

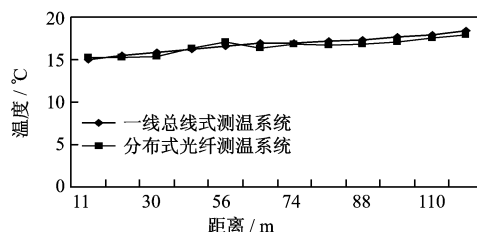


图 5 一线总线式测温系统与分布式光纤测温系统测得的地层原始地温曲线

冷冻站运转一段时间后,地层温度开始下降,由一线总线式测温系统与分布式光纤测温系统测得的

2 组冻结孔内温度曲线如图 6 所示。

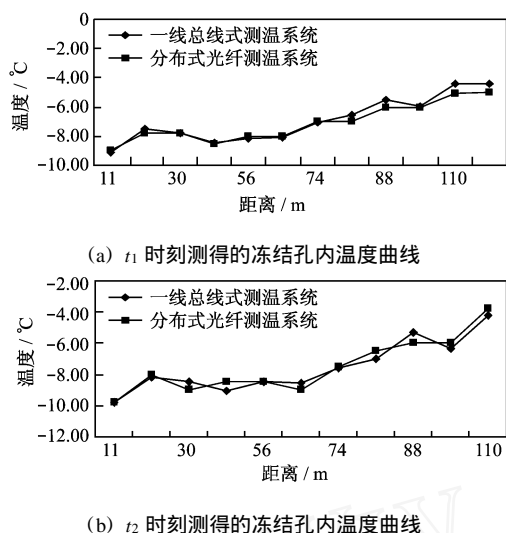


图 6 一线总线式测温系统与分布式光纤测温系统测得的 2 组冻结孔内温度曲线

通过多次测量并对比测量结果发现:分布式光纤测温系统与一线总线式测温系统的测量结果存在误差,误差曲线如图 7 所示。

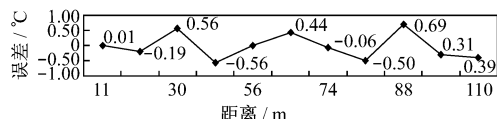


图 7 分布式光纤测温系统与一线总线式测温系统所测结果的误差曲线

从图 7 可看出,分布式光纤测温系统与一线总线式测温系统的最大测温误差为 0.69,平均误差为 0.5。一线总线式测温系统经计量研究院检测后,系统最大测量误差小于 0.2,因此,本文设计的分布式光纤测温系统的测温误差不超过 1,满足冻结工程的测温要求。

#### 4 结语

通过室内实验可知:欲提高测量精度,关键是提高信噪比,提高有用信号强度;欲提高系统空间分辨率,要求信号处理部分具有较宽的带宽,但无限制地提高系统空间分辨率将会导致系统采集大量数据,增加数据处理任务量,使温度测量时间延长,最后可能导致系统实时性变得很差,不能很好地满足工程需要或无法使用。

通过现场试验可知:将分布式光纤测温系统应用于冻结施工中,可测量整个冻结壁温度场的分布情况,及时发现温度异常点,正确指导冻结施工,满足信息化施工的要求。

#### 参考文献:

- [1] 刘招伟,赵运臣. 城市地下工程施工监测与信息反馈技术[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 翟延忠. 地层冻结监测中超长距离一线总线驱动技术的研究[J]. 建井技术, 2004, 25(6): 20~23.
- [3] 赵怀固,沈华军,潘存银. 冻结温度监测仪引进与应用研究[J]. 西部探矿工程, 2005, 105(2): 131~132.
- [4] 杨士娟,李 缓. 拉曼散射光谱及应用[J]. 中国现代教育装备, 2006(8): 56~58.
- [5] 常 程. 基于后向拉曼散射分布式光纤测温系统及其关键技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2000.
- [6] 刘德明. 光纤传感系统的信号处理的研究[R]. 武汉:华中科技大学, 1999.
- [7] CELIKEL O. Mode Field Diameter and Cut-off Wavelength Measurements of Single Mode Optical Fiber Standards Used in OTDR Calibrations [J]. Optical and Quantum Electronics, 2005, 37(6): 587~604.

## PJG1 矿用隔爆兼本安型高压真空配电装置

PJ G1 矿用隔爆兼本安型高压真空配电装置是由天地(常州)自动化有限公司研制推出的,主要用于对煤矿井下额定电压为 10/6 kV、额定频率为 50 Hz、额定电流为 0~630 A 的中性点不接地供电系统进行控制和保护,也可用于直接启动高压电动机。

PJ G1 矿用隔爆兼本安型高压真空配电装置的主要功能:采用交流实时采样技术,测量电网三相电压、三相电流、有功、无功功率、功率因数和电能等电力参数;具有带时限过电流、短路、电缆绝缘监视和单相接地及操作过电压等多种保护功能,并有故障记录功能;具有本质安全型通信接口,可通过电力监

控系统实现“四遥”功能。

PJ G1 矿用隔爆兼本安型高压真空配电装置的主要特点:高压真空断路器真空灭弧采用固封极柱技术,巧妙地解决了固体绝缘结构所带来的散热困难问题,消除了真空泡表面爬电现象,使断路器真空灭弧室不受外界环境(如灰尘、潮气等)的影响,真正实现了灭弧室的免维护;主回路采用镀银导电杆及压嘴式扁触头,使主回路接触电阻大大减少,设备的动热稳定性好;断路器小车推进机构采用蜗轮、蜗杆传动,操作轻巧、灵活准确。

(本刊编辑部)